

Димитар Димитров
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ – Скопје, Факултет за електротехника и информациски технологии

Марко Поповиќ
ЕВН Македонија, АД Скопје

Атанас Илиев,
Софија Николова-Поцева
Универзитет „Св. Кирил и Методиј“ – Скопје, Факултет за електротехника и информациски технологии

Димитар Арсов
АД ЕЛЕМ

ДИМЕНЗИОНИРАЊЕ НА АВТОНОМЕН ФОТОВОЛТАИЧЕН СИСТЕМ СО ПРИМЕНА НА LOLP МЕТОДА

КУСА СОДРЖИНА

Електрификацијата на мали потрошувачи на електрична енергија, што се оддалечени од дистрибутивната мрежа, често е исплатливо да се изведе со примена на автономни системи за снабдување, како што се: дизел агрегати, фотоволтаични системи и др.

Во овој труд се разгледува примената на автономен фотоволтаичен систем за снабдување на телекомуникациски објект, со дневна потрошувачка на електрична енергија од околу 5 kWh. За димензионирање на фотоволтаичниот систем е применета софтверската алатка NsolVx, која користи сложен математичко-статистички модел за генерирање на податоците за сончевото зрачење и определување на перформансите на системот. При димензионирањето со оваа алатка се варира инсталираната моќност на фотоволтаичниот генератор и инсталираниот капацитет на батериите, при што се следи дали потрошувачот континуирано е снабден со електрична енергија. Со цел да се намалат инвестиционите трошоци, при димензионирањето се користи т.н. Loss-of-Load-Probability (LOLP) метод, при што се определува колкав дел од времето системот може да не го снабди потрошувачот.

Елаборирани се неколку варијанти на фотоволтаични системи со различни моќности на ФВ генераторот и капацитетот на батериите, кои се прифатливи за снабдување на објектот. Прикажано е влијанието на процентуалниот дел од времето кога потрошувачот не е снабден со електрична енергија, во однос на потребната инвестиција.

Клучни зборови: фотоволтаични системи, димензионирање, автономно снабдување, LOLP метод, NsolVx.

1 ВОВЕД

Поради потребата од високи инвестиции, електрификацијата на помалите потрошувачи, што се значително оддалечени од електро дистрибутивната мрежа, може на поисплатлив начин да се изведе со т.н. автономни системи за производство на електрична енергија. За оваа намена, во практиката, постои долгогодишна традиција на користење на дизел агрегати. Заради подобрување на перформансите (зголемена доверливост, намалени трошоци за тековно работење и одржување и сл.), во овие системи се инсталираат и акумулаторски батерии. Понатамошно подобрување на перформансите може да се добие со т.н. хибридизација на системот, т.е.

додавање на дополнителни извори на електрична енергија, најчесто од обновлив тип, како што се фотоволтаичен (ФВ) генератор, ветерен генератор и др. [1]

Еден од можните начини за снабдување на споменатите потрошувачи, е со примена на систем што содржи ФВ генератор и акумулаторска батерија. Во однос на системите со дизел агрегат, овие системи имаат поедноставна изведба, пониски трошоци за тековно работење и одржување, не создаваат бучава и не ја загадуваат животната средина. Исто така, нивна важна предност е модуларноста, што подразбира можност за инсталирање на системи со различни моќности (од најниска до највисока). Во моментот главен недостаток се повисоките инвестициони трошоци, но, тие имаат тренд на намалување, што пред сè се должи на намалувањето на цената на ФВ модулите, но и на останатите компоненти. Тоа значи дека нивната застапеност во иднина се очекува да расте. Потенцијални потрошувачи за кои може да се примени ваков начин на снабдување се: издвоени викендички и викенд населби, системи за наводнување, јавно осветлување, станици за мониторинг, телекомуникациски објекти и др. [1, 2, 4-9]

Димензионирањето на автономните ФВ системи е сложен процес, кое покрај што зависи од локалните метеоролошки услови (сончево зрачење, температура и др.) зависи и од правилната оценка на дијаграмот на потрошувачка на електрична енергија, но и од цената на компонентите [6,9]. Намалувањето на инвестицијата, преку намалување на инсталираните капацитети на компонентите на системот доведува до несакани прекини при снабдувањето на потрошувачите. Спротивно на тоа, предимензионирањето на компонентите ја поскапува инвестицијата. И двете крајности доведуваат до појава на скепса при примената на автономните ФВ системи и нивна помала застапеност. Поради ова, при димензионирањето, покрај основните параметри на системот, треба да се има податок што ја отсликува доверливоста при снабдувањето на потрошувачите. Доверливоста покажува колкав дел од времето, потрошувачите ќе бидат сигурно снабдени со електрична енергија [6].

Доверливоста на снабдување со електрична енергија, кај автономен ФВ систем зависи од инсталираната моќност на ФВ генераторот и наклонот на неговите модули, капацитетот на батериите и други параметри. Еден од показателите за доверливоста на системот (иако во суштина има спротивно значење) е веројатноста дека потрошувачот нема да се напојува (*Loss of Load Probability – LOLP*) [10]. Овој параметар покажува колкав процент од времето потрошувачите нема да бидат снабдени со електрична енергија. Со познавање на *LOLP* може да значително да се намалат инвестиционите трошоци за автономниот ФВ систем, особено во случај кога може да се допушти одреден број часови потрошувачот да не биде снабден. Имајќи предвид дека сончевото зрачење е делумно со случаен карактер, за определување на *LOLP* се користат сложени математичко-статистички модели.

Во овој труд се разгледува примената на снабдување на телекомуникациски потрошувачи со помош на автономен ФВ систем. Притоа за да се намалат инвестиционите трошоци, а воедно да се запази посакуваната доверливост при снабдувањето со електрична енергија, при димензионирањето на компонентите е применета *LOLP* методата. За димензионирање, е применета софтверската алатка NSolVx [3] која користи сложен математичко статистички модел за генерирање на податоците за сончевото зрачење, при што за одредена комбинација од инсталирана моќност на ФВ генератор и капацитет на батериите, како излез дава колкав дел од времето системот не го снабдува потрошувачот.

2 LOLP МЕТОДА

Вредноста на *LOLP* се намалува со зголемување на инсталираната моќност на ФВ генераторот (број на ФВ модули) и со зголемување на капацитетот на акумулаторската батерија. Во практиката, често капацитетот на батериите се изразува преку т.н. денови на автономија, т.е. бројот на денови кој може да се снабди потрошувачот без воопшто да се полнат батериите, ако тие претходно се целосно наполнети.

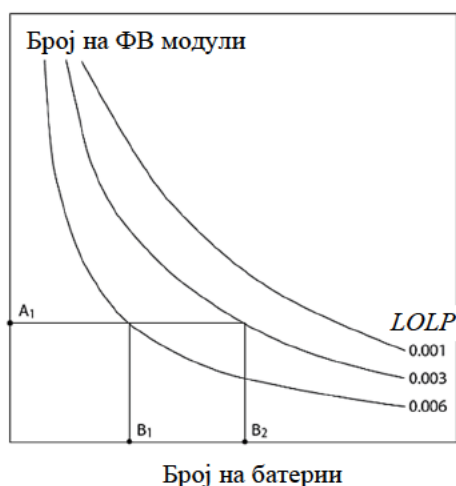
Покажано е дека *LOLP* може да се определи со апроксимација на функцијата на густина на веројатност на разликата меѓу дневното производство на ФВ генераторот и потрошувачката

на електрична енергија, при претпоставка дека полнењето и празнењето на батериите може да се претстави со Марков процес [2]. Покажано е дека функција на распределба на веројатност на сончевото зрачење (изразено преку коефициентот на транспарентност, што се смета за независна променлива) во тек на еден месец, независно од локацијата и периодот во годината, зависи само од средната вредност на коефициентот на транспарентност [2]. Ова практично значи дека со процесите на генерирање на часовни и дневни податоци за сончевото зрачење, што во себе ги содржат истите статистички и секвенцијални карактеристики како и реалните низи со податоци за сончевото зрачење, може да се определат периоди при кои во континуитет сончевото зрачење ќе има пониска вредност, па даден ФВ систем одреден период нема да може да обезбеди доволно електрична енергија за снабдување на потрошувачот.

Ваков модел е применет во софтверската алатка NSoIVx [3]. Притоа, за дадена локација, потрошувач, тип на ФВ модули, тип на батерии се симулираат перформансите на автономни ФВ системи со различен број на ФВ модули и различен број батерии. Резултат од симулациите, покрај другите перформанси е пресметаниот *LOLP*. Притоа, доколку $LOLP = 0,001$, тоа значи дека потрошувачот нема да биде снабден $0,001 \times 8760 = 8,7$ часа во тек на една година.

Ако се направат симулации за различни комбинации од број на ФВ модули и број на батерии и доколку се групираат системите што имаат приближно иста вредност на *LOLP*, може да се исцртаат фамилии од *LOLP* криви, како што е прикажано на слика 1. Како и што се очекува, од сликата се гледа дека со зголемување на бројот на батерии се намалува *LOLP*. Слично може да се заклучи, дека и со зголемување на бројот на ФВ модули, се намалува *LOLP*.

LOLP кривите се погодни при димензионирање на автономните ФВ системи. Притоа, доколку се земат предвид цените на ФВ модулите и батериите, може да се избере нивна комбинација, при што ќе се добие систем со најниска цена, за дадена вредност на *LOLP*.



Слика 1 *LOLP* криви за автоном. ФВ систем

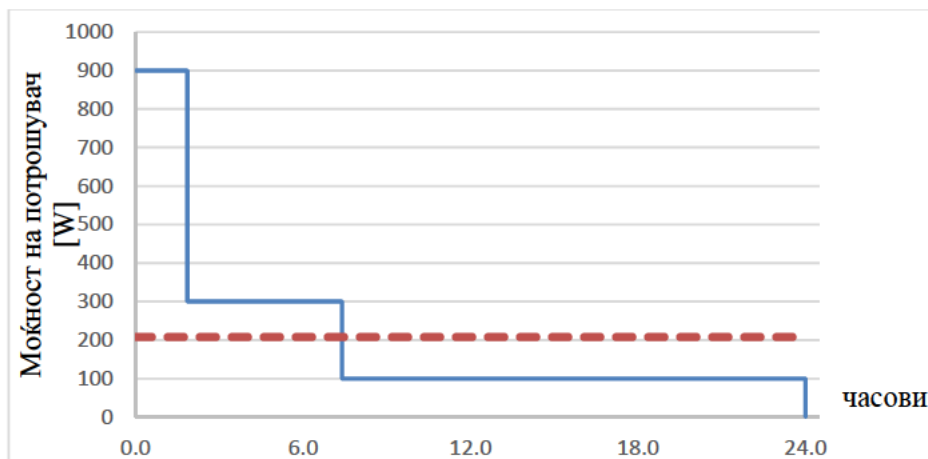
3 ПОДАТОЦИ ЗА РАЗГЛЕДУВАНИОТ АВТОНОМЕН ФВ СИСТЕМ

3.1 Дијаграм на потрошувачка

При димензионирањето на системите за автономно снабдување со електрична енергија, многу е важна правилната оценка на дијаграмот на потрошувачка. За потребите на овој труд е земено предвид искуството на стручни лица кои работат со телекомуникациски уреди. Притоа режимот на работа на уредите се одвива во 3 фази: емитурање (active mode) мирување (stand-by mode) и „спињење“ (sleep mode). Моќноста за секоја фаза се определува од односот 9:3:1, а времетраењето на секоја фаза 1:3:9, соодветно. Така, при работа од 24 часа, $1/(1+3+9) = 1/13$ од времето објектот ќе има максимална моќност (емитира), $3/13$ од времето ќе има $1/3$ од максималната моќност (stand by) и $9/13$ од времето ќе има $1/9$ од вкупната моќност (sleep). [5]. Притоа е претпоставено дека уредите со прикажаниот начин на работа функционираат постојано, независно од периодот во годината и од периодот во денот. Дополнително е претпоставено дека моќноста на телекомуникациските уреди во режим на емитурање изнесува $P = 900$ W. На слика 1 е прикажан дијаграмот на времетраење на моќноста на уредите. Просечната моќност на телекомуникацискиот објект, може да се одреди како:

$$P_{ave} = \frac{1 \cdot \frac{P}{1} + 3 \cdot \frac{P}{3} + 9 \cdot \frac{P}{9}}{13} = \frac{3 \cdot P}{13} = \frac{3 \cdot 900}{13} = 207,7 \text{ W}, \quad (1)$$

каде P е моќноста на телекомуникацискиот објект.



Слика 2 Дијаграм на времетраење на потрошувачка на телекомуникацискиот објект

Потрошената енергија на уредите во тек на еден ден изнесува:

$$E = 24 \cdot 207,7 = 4,985 \frac{\text{kWh}}{\text{ден}}. \quad (2)$$

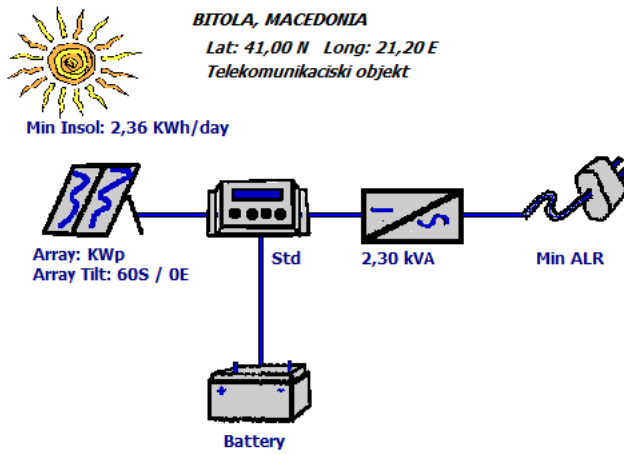
3.2 Компоненти на системот

Системот се состои од ФВ генератор, батерии, контролер за полнење на батериите и инвертор за добивање на наизменичен напон (Слика 3). Вредноста на еднонасочниот напон е 48 V, додека вредноста на наизменичниот напон е 230 V.

При анализите во овој труд основните компоненти на системот се избрани од базата на податоци на NSolVx и со следни номинални податоци:

- ФВ модул – тип Kyocera KD135SX, 36 ќелии изработени од поликристален силициум, моќност 135 Wp, напон на празен од $V_{oc} = 22,1 \text{ V}$, напон во точка на максимална моќност $V_{mp} = 17,7 \text{ V}$, струја на куса врска $I_{sc} = 8,37 \text{ A}$, струја во точка на максимална моќност $I_{mp} = 7,63 \text{ A}$
- Батерија – Solar Bloc, напон 12 V, капацитет 144 Ah.

ФВ модулот и батеријата за наменети за напонско ниво од 12 V. За добивање напон од 48 V, тие се поврзуваат во гранки (стрингови) што содржат низи од по четири модули или батерии. Фактички, при димензионирањето се определува бројот на гранки што паралелно се поврзуваат. Инверторот и полначот на батериите е претпоставено дека ги задоволуваат сите работни режими и не се предмет на димензионирање на системот.

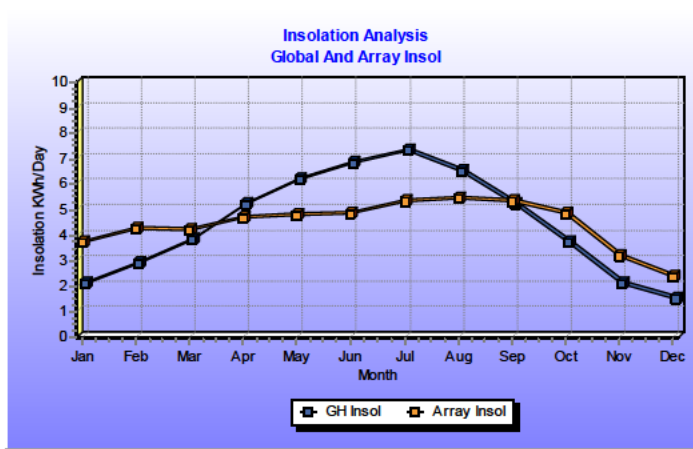


Слика 3 Шема на поврзување на елементите во автономниот ФВ систем

3.3 Локација

Во овој труд е земено дека локацијата на поставување на телекомуникацискиот објект е во близина на Битола (со северна географска ширина 41,00° и источна географска должина 21,20°). Соодветно на тоа, се искористени податоците за сончевото зрачење врз хоризонтална површина и температурата од базата на NSoIVx. Овие податоци се прикажани на втората и третата колона од табела 1.

Зголемување на сончевото зрачење се постигнува со наклонување на ФВ модулите, со нивна ориентација кон југ. Аголот на наклон се избира така што врз површината на ФВ модулите во критичниот месец да упаѓа најголемо сончево зрачење. Од табела 1, може да се забележи дека критичен месец (со најниска вредност на сончевото зрачење), е декември. NSoIVx содржи алатка за пресметка на сончевото зрачење врз наклонета површина. Притоа со помена на аголот и прочитување на вредностите, е заклучено дека највисока вредност на сончевото зрачење во декември се добива за наклон на ФВ модулите од 60°. На слика 4 и на табела 1 се прикажани вредностите на сончевото зрачење врз хоризонтална и наклонета површина (60°) за секој месец во годината. Може да се забележи дека во летните месеци при наклон од 60°, сончевото зрачење врз наклонета површина има пониска вредност отколку при хоризонтално поставена. Како и да е, и при ваков случај апсолутната вредност на енергијата на сончевото зрачење е сèуште доволна за снабдување на потрошувачот.



Слика 4 Сончево зрачење врз хоризонтална и наклонета површина

Табела 1 Метеоролошки податоци врз хоризонтална и наклонета површина

	Сончево зрачење врз хоризонтална површина [kWh/(m ² ден)]	Просечна температура [°C]	Коефициент на транспарентност	Коеф. на зголемување на сонч. зрачење при наклон (60°)	Сончево зрачење врз наклонета површина (60°) [kWh/(m ² ден)]
јан	2,00	1,1	0,51	1,84	3,68
фев	2,80	2,9	0,52	1,51	4,24
мар	3,70	6,5	0,50	1,13	4,17
апр	5,10	12,1	0,54	0,92	4,68
мај	6,10	17,0	0,56	0,78	4,77
јун	6,70	21,6	0,58	0,72	4,85
јул	7,20	23,8	0,64	0,74	5,31
авг	6,40	23,7	0,63	0,84	5,41
сеп	5,10	18,6	0,61	1,05	5,34
окт	3,60	11,9	0,58	1,34	4,83
ное	2,00	7,2	0,45	1,58	3,16
дек	1,40	2,9	0,39	1,69	2,36

Табела 2 Варијанта 1 (се менува капацитетот на батеријата)

Паралелни гранки со батерии	2	3	4	5	6	7	8
Капацитет [Ah]	288	432	576	720	864	1008	1152
Денови на автономија	2,2	3,2	4,3	5,4	6,5	7,6	8,7
Макс. акумул. енергија [kWh]	13,8	20,7	27,6	34,6	41,5	48,4	55,3
LOLP [%]	13,561	6,021	2,815	1,352	0,657	0,322	0,158
ALR	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27	2,27
Avg BSOC [%]	89	93	94	95	96	97	97
Достапност [%]	98,699	99,48	99,763	99,887	99,945	99,973	99,987

Табела 3 Варијанта 2 (се менува инсталираната моќност на ФВ генераторот)

Бр. на гранки со ФВ модули	7	8	9	10	11	12	13
Број на ФВ модули	28	32	36	40	44	48	52
LOLP (%)	21,513	13,561	8,055	5,355	3,707	2,841	2,212
ALR	1,99	2,27	2,56	2,84	3,13	3,41	3,69
Avg BSOC (%)	89	89	90	91	91	90	89
Достапност	97,867	98,699	99,231	99,49	99,641	99,723	99,785

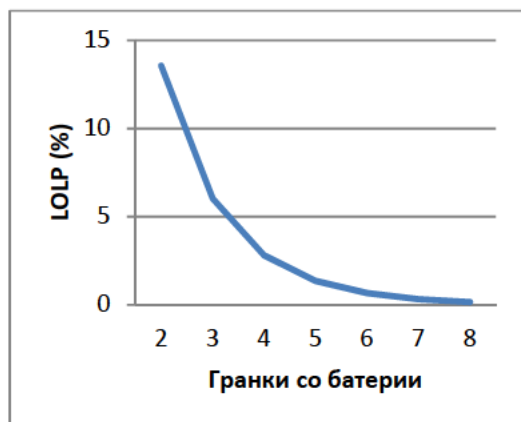
4 ДИМЕНЗИОНИРАЊЕ НА ФВ СИСТЕМОТ

Кога веќе е определен аголот на наклон на ФВ модулите и составот на гранките, во следниот чекор на димензионирање се определува бројот на паралелно поврзни гранки. За да се утврди влијанието на ФВ генераторот и батеријата врз *LOLP*, се разгледани две варијанти.

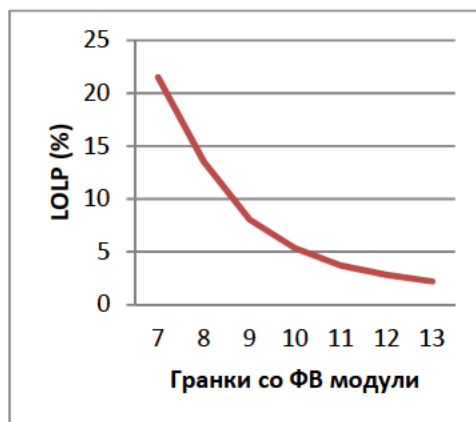
Во првата варијанта бројот на гранки со ФВ модули е константен 8 гранки (32 ФВ модули), а бројот на батериски гранки се менува од 2 до 8. Притоа на табела 2 се дадени вредностите на капацитетот на батериите, деновите на автономија, максималната акумулирана енергија во батериите, *LOLP* изразен во проценти од времето, односот меѓу енергијата произведена од ФВ генераторот и вкупната потрошувачка (*Array-to-Load-Ratio – ALR*), просечната наполнетост на батериите (*BSOC*) и достапноста на системот. На слика 5 е прикажана зависноста на *LOLP* во однос на бројот на паралелни гранки со батерии. Се забележува дека зголемувањето на батериските гранки над 5 незначително го намалува *LOLP*.

Во втората варијанта бројот на батериски гранки е константен –2 гранки (8 батерии), а бројот на гранки со ФВ модули се менува од 7 до 13 (табела 3). На слика 6 е прикажана зависноста

на *LOLP* во однос на бројот на паралелни гранки со ФВ модули. Притоа, со зголемување на бројот на овие гранки над 10 незначително се намалува *LOLP*.



Слика 5 Зависност на *LOLP* од бројот на батериски гранки



Слика 6 Зависност на *LOLP* од бројот на гранки со ФВ модули

Со цел да се прикаже влијанието на моќноста на ФВ генераторот и капацитетот на батериите врз *LOLP* за секој месец, на табела 4 се дадени резултатите за три различно димензиониран ФВ системи и тоа со:

- 8 гранки со ФВ модули ($ALR = 2,27$, 4320 Wp) и 2 батер. гранки (автоном. 2,2 денови)
- 8 гранки со ФВ модули ($ALR = 2,27$, 4320 Wp) и 7 батер. гранки (автоном. 7,6 дена)
- 11 гранки со ФВ модули ($ALR = 3,13$, 5940 Wp) и 2 батер. гранки (автоном. 2,2 денови)

Од резултатите дадени на табела 4 може да се заклучи дека и при агол на наклон од што најмногу одговара на месец декември, *LOLP* има најголеми вредности токму во тој месец. Системот со 8 гранки со ФВ модули 2 батериски гранки во 11 месеци целосно го снабдува потрошувачот, а во декември потрошувачот не е снабден 0,322 % од вкупното време, или $(0,322 / 100) \times 31 \times 24 = 2,4$ часа.

Табела 4 Просечна состојба на наполнетост и *LOLP* (по месец)

	8 гранки ФВ модули 2 гранки батерии		8 гранки ФВ модули 7 гранки батерии		11 гранки ФВ модули 2 гранки батерии	
	Avg BSOC [%]	LOLP [%]	Avg BSOC [%]	LOLP [%]	Avg BSOC [%]	LOLP [%]
Јан	88	0,451	97	0,000	90	0,179
Фев	89	0,209	97	0,000	90	0,107
Мар	91	0,069	97	0,000	92	0,025
Апр	92	0,011	98	0,000	93	0,002
Мај	94	0,006	98	0,000	93	0,001
Јун	94	0,004	98	0,000	93	0,000
Јул	93	0,000	98	0,000	93	0,000
Авг	93	0,000	98	0,000	93	0,000
Сеп	93	0,000	98	0,000	93	0,000
Окт	92	0,023	98	0,000	92	0,016
Ное	85	1,280	95	0,000	89	0,275
Дек	69	13,561	86	0,322	80	3,707

5 ЗАКЛУЧОК

Во трудот е елабориран начин за автономно снабдување на телекомуникациски објект со примена на ФВ систем, како алтернатива на поврзувањето со електро дистрибутивна мрежа и автономно снабдување со дизел агрегат. За снабдување со електрична енергија се користи систем

од целосно обновлив тип, поради што е еколошки прифатлив. Во системот нема вртливи делови, а со тоа за одржување се потребни ниски трошоци.

Доверливоста при снабдувањето на потрошувачот зависи од инсталираната моќност и капацитетот на компонентите на системот (ФВ генератор и акумулаторска батерија). Доколку се работи за некритични потрошувачи за кои е дозволено одреден број часови да бидат без напојување, цената на системот може значително да се намали. Најчесто како показател за континуираноста при снабдувањето е параметарот (со спротивно значење) „веројатност потрошувачот да не биде снабден“ – *LOLP*. При димензионирање со примена на *LOLP* (*LOLP*-метода) се определува комбинација од инсталирана моќност на ФВ генератор и капацитет на батериите при што одреден број часови во тек на една година потрошувачот нема да биде снабден.

Правилната проценка на потрошувачката на електрична енергија е многу важна за правилното димензионирање на потрошувачот. Параметрите *ALR* на ФВ генераторот и деновите на автономија на батеријата се пропорционални на дневната вредност на потрошувачката на електрична енергија. Според тоа, секоја промена на потрошувачката, било при димензионирањето или при функционирањето на системот, треба да биде проследена со промена на моќноста на ФВ генераторот и со капацитетот на батериите. Во спротивно, времетраењето на прекините при снабдувањето ќе се промени.

6 ЛИТЕРАТУРА

- [1] Д. Димитров: "Споредба на перформансите на три типа на системи за автономно снабдување со електрична енергија", Петто советување на МАКО-СИГРЕ, Зборник на трдови С6-11R, Охрид, октомври, 2007.
- [2] D. Dimitrov: "Occurrence Probability of Daily Solar Radiation Data Series, with Application to Hybrid Photovoltaic Systems", 4rd Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion – MEDPOWER'04, Conference Proceedings CD-ROM, ISBN 9963-8275-2-7, Lemesos, Cyprus, 14 – 17 November, 2004.
- [3] <http://www.nsolpv.com>, посетена на 15 јуни 2017.
- [4] "METEONORM Version 6.0, Handbook part II: Theory, Version 6.120." 2010. Јануари 2016. <http://www.meteonorm.com>, посетена на 15 јуни 2017.
- [5] Разговор со експерти во областа на телекомуникациите. Скопје, Декември 2015.
- [6] H. Haberlin. *PHOTOVOLTAICS system design and practice*. Southern Gate, Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd, 2012.
- [7] *Planning and Installing Photovoltaic Systems*. London; Sterling, VA, First published by Earthscan in the UK and USA in 2008, First edition published in 2005, reprinted 2006.
- [8] M.S. Imamura, P. Helm, W. Palz: *Photovoltaic System Technology – A European Handbook*. Commission of the European Communities, H S Stephens, Felpersham, 1992, ISBN 0-9510271-9-0.
- [9] NERC North American electric reliability corporation. *Methods to Model and Calculate Capacity Contribution of Variable Generation for Resource Adequacy Planning*. March 2011.
- [10] S. Kebaili, H. Benalla: "Optimal sizing of a stand-alone photovoltaic systems under various weather conditions in Algeria", *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 18 N°2 (2015) 179 – 191.